

# 基于仿射变换与 Levenberg-Marquardt 算法的 织物图像配准

张彪<sup>1</sup>, 邹哲<sup>1</sup>, 陈书界<sup>1</sup>, 沈会良<sup>1</sup>, 邵思杰<sup>2</sup>, 忻浩忠<sup>2</sup>

<sup>1</sup>浙江大学信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310007;

<sup>2</sup>香港理工大学纺织及制衣学系, 香港 999077

**摘要** 针对多光谱成像系统采集的织物图像的颜色色差分析问题, 提出了一种基于仿射变换与 Levenberg-Marquardt (LM) 算法的图像配准方法。从配准角度出发, 利用提出的配准方法将标样图像与打样图像配准后进行空间色差分析。多光谱系统采集的织物图像的形变, 包括平移、旋转、缩放和错切变换, 符合典型仿射变换模型。提出一种新的方法来估计仿射变换矩阵, 该方法对两幅图像的对数极坐标幅度谱积分曲线进行匹配, 将仿射变换矩阵求解转化为一个非线性最小二乘拟合问题, 进而利用 LM 算法搜寻最优参数值, 同时引入分块配准以得到更好的配准效果。实验结果表明, 与传统基于 Fourier-Mellin 配准算法和基于尺度不变特征变换的特征点配准算法相比, 提出的算法可获得更好的配准效果, 可有效解决具有周期性元素的织物图像配准问题, 有助于织物图像色差评估。

**关键词** 颜色; 图像配准; 对数极坐标幅度谱; 仿射变换; 织物图像; Levenberg-Marquardt 算法; 色差分析; 分块配准

中图分类号 TP751.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0133002

## Fabric Image Registration Based on Affine Transform and Levenberg-Marquardt Algorithm

Zhang Biao<sup>1</sup>, Zou Zhe<sup>1</sup>, Chen Shujie<sup>1</sup>, Shen Huiliang<sup>1</sup>, Shao Sijie<sup>2</sup>, Xin Haozhong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University,

Hangzhou, Zhejiang 310007, China;

<sup>2</sup>Institute of Textiles and Clothing, The Hong Kong Polytechnic University,

Hong Kong 999077, China

**Abstract** In order to solve the problem of color difference analysis for textile fabric images captured by a multispectral system, a new method of image registration based on affine transform and Levenberg-Marquardt (LM) algorithm is proposed. In a registration perspective, the standard image and the batch image are first matched by the proposed method and then taken for analysis of color difference. The deformation of the textile image captured by the multispectral system, including translation, rotation, scaling and shearing, conforms to the classic model of affine transform. To estimate the transform matrix, the proposed method first calculates the integral curves of the log-polar magnitude spectra of the two images for mapping. The original problem of solving the transform matrix is then converted to a numerical problem of nonlinear least squares fitting where the LM algorithm is employed for optimal value searching. Besides, the block registration is introduced to achieve more accurate registration. Experimental results show better registration accuracy of the proposed algorithm compared with the traditional Fourier-Mellin algorithm as well as the scale invariant feature transform based feature point matching method. It also solves the registration problem for textile images with periodic patterns effectively, which

收稿日期: 2016-07-19; 收到修改稿日期: 2016-08-26

基金项目: 国家自然科学基金(61371160)、香港纺织及成衣研发中心资助项目(ITP/048/13TP)

作者简介: 张彪(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事图像处理方面的研究。E-mail: bz@zju.edu.cn

导师简介: 沈会良(1974—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事图像处理与颜色视觉方面的研究。

E-mail: shenhl@zju.edu.cn(通信联系人)

contributes to the following process of color difference evaluation.

**Key words** color; image registration; log-polar magnitude spectra; affine transform; fabric image; Levenberg-Marquardt algorithm; color difference analysis; block registration

**OCIS codes** 330.1710; 100.2000; 100.4994; 330.1730

## 1 引 言

在对多光谱成像系统<sup>[1-2]</sup>采集的织物图像进行颜色分析<sup>[3]</sup>时,存在一个典型问题,即需要进行标样图像与打样图像之间的色差评估<sup>[4-6]</sup>。传统方法分别对标样图像与打样图像分割后进行色差评估<sup>[7-9]</sup>,但分割过程往往需要人工交互,在打样图像很多的情况下,操作繁琐、颜色比较接近,且图像纹理复杂时并不能保证图像分割的正确性。标样图像与打样图像纹理相同但相互之间存在一定形变,本文从图像配准<sup>[10-11]</sup>的角度出发,将标样和打样图像进行配准,进而获得标样与打样图像之间的空间色差图。空间色差图可给出标样图像与打样图像之间的色差分布概况,相比于传统基于分割获取单色进行逐单色比较的方法,基于空间色差图进行颜色评估更为直观。

多光谱系统实际采集的标样图像与打样图像之间存在平移和旋转变换,由于纱线织成的织物为非刚体,所以也会存在缩放和错切等形变,导致打样图像与给定标样图像不能对齐。该问题可抽象为典型的基于仿射变换模型的图像配准问题。如果图像之间仅存在平移,则可通过现有的基于快速傅里叶变换(FFT)的相位相关检测方法<sup>[12]</sup>进行配准。相位相关检测法隶属频域变换的配准方法,配合对数极坐标变换方法可扩展为 Fourier-Mellin 图像配准算法<sup>[13]</sup>,从而可以解决存在平移、旋转与缩放的图像的配准问题,但是 Fourier-Mellin 算法不能解决存在错切等变换的图像配准问题。

典型的仿射变换包含 6 个变换参数,仿射参数的估计可采用空间域的对数极坐标变换<sup>[14]</sup>或基于尺度不变特征变换(SIFT)的特征点检测<sup>[15]</sup>。空间域对数极坐标变换方法通过配准放射线得到仿射参数<sup>[14]</sup>,但需要多分辨率迭代搜索变换的中心,增加了算法的时间成本;而基于 SIFT 的特征点检测方法<sup>[16-18]</sup>对于一般的自然图像可以达到较好的配准效果,但包含周期性元素的织物图像重复纹理的特征描述子相同,无法得到可靠的匹配点对来估计仿射参数。

本文提出一种新方法来解决一般性的织物图像配准问题,包含平移、旋转、缩放和错切变换并且存在周期性元素的织物图像配准问题。采用图像频域的对数极坐标幅度谱积分曲线来描述图像特征,通过配准图像频域对数极坐标幅度谱积分曲线可以直接得到仿射参数。从理论上论述了对数极坐标幅度谱积分曲线这一图像特征与仿射变换参数之间的直接关系,在此基础上通过 Levenberg-Marquardt (LM)非线性拟合算法<sup>[19]</sup>来匹配对数极坐标幅度谱积分曲线进而得到仿射参数,最终得到一种基于仿射变换织物图像配准的行之有效的办法。另外,两幅织物图像全图之间可能不容易找到一个仿射变换使所有的局部区域配准良好,因此又引入了分块配准<sup>[20]</sup>的思路使配准更为准确。与空间域的对数极坐标变换相比,该方法采用频域的对数极坐标变换特征,避免了对图像变换中心的讨论。该方法可视为 Fourier-Mellin 方法在仿射变换应用中的扩展。

## 2 基于仿射变换与 LM 算法的图像配准

将织物图像之间存在的变换用坐标仿射变换模型来表达,从理论上建立了对数极坐标频谱积分曲线与仿射参数之间的关系。

### 2.1 仿射变换

考虑两幅图像  $f(x, y)$  与  $g(x, y)$ ,  $g(x, y)$  由  $f(x, y)$  经过坐标仿射变换得到,即

$$g(x, y) = f(a_{11}x + a_{12}y + x_0, a_{21}x + a_{22}y + y_0), \quad (1)$$

式中  $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}, x_0, y_0$  为待求解的仿射变换参数。根据(1)式,图像  $g(x, y)$  的傅里叶变换为

$$G(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(a_{11}x + a_{12}y + x_0, a_{21}x + a_{22}y + y_0) \exp[-j2\pi(ux + vy)] dx dy. \quad (2)$$

将坐标的仿射变换表示为矩阵形式,

$$\begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中  $\tilde{x}, \tilde{y}$  为转换后的坐标,且

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

不难得到

$$d\tilde{x} d\tilde{y} = \det(\mathbf{A}^T) dx dy = \det(\mathbf{A}) dx dy, \quad (5)$$

$$ux + vy = \frac{1}{\det(\mathbf{A})} [(a_{22}u - a_{21}v)\tilde{x} + (-a_{12}u + a_{11}v)\tilde{y}], \quad (6)$$

式中  $\det(\mathbf{A})$  表示矩阵  $\mathbf{A}$  的行列式,将(5)式和(6)式代入(2)式并两边取模,得

$$\begin{aligned} |G(u, v)| &= \left| \frac{1}{\det(\mathbf{A})} \int f(\tilde{x} + x_0, \tilde{y} + y_0) \exp \left[ -j2\pi \frac{(a_{22}u - a_{21}v)\tilde{x} + (-a_{12}u + a_{11}v)\tilde{y}}{\det(\mathbf{A})} \right] d\tilde{x} d\tilde{y} \right| = \\ & \left| \frac{1}{\det(\mathbf{A})} \right| \left| F \left[ \frac{a_{22}u - a_{21}v}{\det(\mathbf{A})}, \frac{-a_{12}u + a_{11}v}{\det(\mathbf{A})} \right] \right|. \end{aligned} \quad (7)$$

令  $\mathbf{P} = \mathbf{A}^{-1}$ ,  $\mathbf{u} = [u, v]^T$  表示频率点位置,进一步可得

$$|G(\mathbf{u})| = |\det(\mathbf{P})| |F(\mathbf{P}^T \mathbf{u})|. \quad (8)$$

(8)式是推导匹配通式的理论基础。至此,问题转化为已知变换前及变换后的图像  $f(x, y)$  与  $g(x, y)$ , 要求估计得到的仿射变换矩阵  $\mathbf{P}$ 。

## 2.2 仿射变换的对数极坐标频谱积分曲线匹配通式

基于 2.1 节的理论基础,推导图像匹配的理论通式。

令

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

将(8)式展开为

$$|G(u, v)| = |\det(\mathbf{P})| |F(p_{11}u + p_{21}v, p_{12}u + p_{22}v)|. \quad (10)$$

直接观察(10)式的对数极坐标变换,首先令  $\rho = \sqrt{u^2 + v^2}$ , 有

$$|G(\lg \rho, \theta)| = |\det(\mathbf{P})| |F[\lg \rho + \lg \phi(\theta), \psi(\theta)]|, \quad (11)$$

式中

$$\phi(\theta) \triangleq \frac{\rho_G}{\rho_F} = \sqrt{(p_{11} \cos \theta + p_{21} \sin \theta)^2 + (p_{12} \cos \theta + p_{22} \sin \theta)^2}, \quad (12)$$

$$\psi(\theta) \triangleq \arctan \frac{p_{12} + p_{22} \tan \theta}{p_{11} + p_{21} \tan \theta}. \quad (13)$$

再令  $z = \lg \rho$ , 并考虑  $z$  方向上的积分,有

$$\int |G(z, \theta)| dz = |\det(\mathbf{P})| \int |F[z + \lg \phi(\theta), \psi(\theta)]| dz = |\det(\mathbf{P})| \int |F[z, \psi(\theta)]| dz. \quad (14)$$

定义对数极坐标频谱积分曲线为

$$H_G(\theta) = \int |G(z, \theta)| dz, \quad (15)$$

$$H_F(\theta) = \int |F(z, \theta)| dz, \quad (16)$$

根据(14)~(16)式可得对数极坐标频谱积分曲线与仿射参数的关系为

$$H_G(\theta) = |\det(\mathbf{P})| H_F[\psi(\theta)], \quad (17)$$

(17)式即为仿射变换的对数极坐标频谱积分曲线匹配通式。

## 2.3 LM 算法非线性拟合求解最佳匹配

仿射参数求解的本质是找到一个与仿射变换参数相关的非线性变换,使两条关于  $\theta$  的曲线  $H_G(\theta)$  和

$H_F(\theta)$ 匹配。其中一种方法是利用  $\psi(\theta)$ 变换的单调性,寻找极值点进行匹配。然而由于离散傅里叶对数极坐标变换存在误差,使两条曲线极值点的精确定位与准确匹配存在很大困难,并且不能保证有足够多的极值点对来稳健地估计变换参数,因此直接用两条曲线进行非线性拟合。

对匹配的两条曲线,其最小二乘代价函数  $\xi$  最小,即

$$\xi = \frac{1}{2} \int \{H_G(\theta) - |\det(\mathbf{P})| H_F[\psi(\theta)]\}^2 d\theta, \quad (18)$$

为消除  $|\det(\mathbf{P})|$  的影响,分别对  $H_G(\theta)$  和  $H_F(\theta)$  作归一化处理:

$$\tilde{H}_G(\theta) = \frac{H_G(\theta)}{\sqrt{\int H_G^2(\theta) d\theta}}, \quad (19)$$

$$\tilde{H}_F(\theta) = \frac{H_F(\theta)}{\sqrt{\int H_F^2(\theta) d\theta}}. \quad (20)$$

则(18)式简化为

$$\xi = \frac{1}{2} \int \{\tilde{H}_G(\theta) - \tilde{H}_F[\psi(\theta)]\}^2 d\theta. \quad (21)$$

进一步离散化为

$$\xi = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \{\tilde{H}_G(\theta_i) - \tilde{H}_F[\psi(\theta_i)]\}^2. \quad (22)$$

上述目标函数可通过 LM 算法求解得到最优化参数  $\mathbf{P}$ 。为便于表示,将待求参数矩阵重写为一维向量的形式,即

$$\mathbf{p} = [p_1, p_2, p_3, p_4]^T = \text{vec}(\mathbf{P}), \quad (23)$$

式中  $\text{vec}(\cdot)$  表示矩阵按列向量化算子。定义

$$h_F(\mathbf{p}) = \{\tilde{H}_F[\psi(\theta_1)], \tilde{H}_F[\psi(\theta_2)], \dots, \tilde{H}_F[\psi(\theta_N)]\}^T, h_G = [\tilde{H}_G(\theta_1), \tilde{H}_G(\theta_2), \dots, \tilde{H}_G(\theta_N)]^T.$$

LM 算法解决该非线性拟合问题的框架及伪代码表示如表 1 所示。

关于  $\mathbf{p}$  的雅可比矩阵为

$$\mathbf{J}_{ij} = \frac{\partial \tilde{H}_F[\psi(\theta_i)]}{\partial p_j}, i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, 3, 4, \quad (24)$$

经过一系列推导可得雅可比矩阵的第  $i$  行为

$$\mathbf{J}_i = \omega(\theta_i) \left[ 1, \tan \theta_i, -\frac{1}{k(\theta_i)}, -\frac{\tan \theta_i}{k(\theta_i)} \right], \quad (25)$$

式中

$$\omega(\theta) = -\frac{k(\theta) \tilde{H}'_F[\psi(\theta)]}{[1 + k^2(\theta)](p_1 + p_2 \tan \theta)}, \quad (26)$$

$$k(\theta) = \frac{p_3 + p_4 \tan \theta}{p_1 + p_2 \tan \theta}. \quad (27)$$

至此,所有的理论推导完毕。

在实际应用中,为了消除亮度的影响以增强算法稳健性,需先利用 Sobel 算子<sup>[21]</sup>得到原图的梯度图,再在梯度图像上进行处理。另外,对数极坐标变换使信息集中在低频段,导致两图像的对数幅度谱积分曲线差异不明显,所以需要图像频域图进行简单的圆盘高通滤波处理。

### 3 实验结果与分析

首先对所提出的配准方法进行仿真验证,再将其用于实际织物图像的配准场景,并利用分块配准进一步提高配准效果,最后根据实际织物图像的配准结果进行空间色差评估。



表 1 LM 算法框架的伪代码表示

Table 1 Framework of the LM algorithm using pseudo-code

---

**Input:** Measurement vector  $\mathbf{h}_G$  and initial parameters  $\mathbf{p}_0$  ;

**Output:** An optimal vector  $\mathbf{p}^*$ , which minimizes  $\|\mathbf{h}_G - \mathbf{h}_F(\mathbf{p})\|^2$  ;

**Initial value:**  $k := 0, v := 2, \mathbf{p} := \mathbf{p}_0$  ;

$\mathbf{A} := \mathbf{J}^T \mathbf{J}, \epsilon_p := \mathbf{h}_G - \mathbf{h}_F(\mathbf{p}), \mathbf{g} := \mathbf{J}^T \epsilon_p$  ;

stop := ( $\|\mathbf{g}\|_\infty \leq \epsilon_1$ ),  $\mu := \tau \max\{\text{diag}(\mathbf{A})\}$  ;

**Algorithm:**

$\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3 = 10^{-6}, \tau = 10^{-3}, k_{\max} = 100$

while (not stop) and ( $k < k_{\max}$ )

$k := k + 1; \delta_p = (\mathbf{A} + \mu \mathbf{I})^{-1} \mathbf{g}$  ;

if ( $\|\delta\|_p \leq \epsilon_2 \|\mathbf{p}\|$ ) stop := true;

else

$\mathbf{p}_{\text{new}} := \mathbf{p} + \delta_p$  ;

$\rho := \frac{\|\epsilon_p\|^2 - \|\mathbf{h}_G - \mathbf{h}_F(\mathbf{p}_{\text{new}})\|^2}{\delta_p^T (\mu \delta_p + \mathbf{g})}$  ;

if  $\rho > 0$

$\mathbf{p} = \mathbf{p}_{\text{new}}$  ;

$\mathbf{A} := \mathbf{J}^T \mathbf{J}, \epsilon_p := \mathbf{h}_G - \mathbf{h}_F(\mathbf{p}), \mathbf{g} := \mathbf{J}^T \epsilon_p$  ;

stop := ( $\|\mathbf{g}\|_\infty \leq \epsilon_1$ ) || ( $\|\epsilon_p\|^2 \leq \epsilon_3$ ) ;

$\mu := \mu \max\left[\frac{1}{3}, 1 - (2\rho - 1)^3\right], v := 2$  ;

else  $\mu := \mu v, v := 2v$  ;

endif

endif

endwhile

---

实验中使用的实际织物图像均由多光谱成像系统采集。该系统由光源、滤片轮和一个单色相机组成,采用滤片轮分光工作模式。在多光谱图像采集过程中,通过滤片轮的转动,将不同波段的滤片放置在物体和相机镜头之间,形成不同波段的光通道,在每个通道下分别对物体成像,从而得到物体在不同通道下的相机响应值,最后通过光谱反射率重建得到多光谱图像。

采集到的织物图像物理尺寸约为  $10 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$ ,图像分辨率为  $1844 \text{ pixel} \times 1388 \text{ pixel}$ 。综合考虑布料物理尺寸、图像分辨率、布料可能产生的扭曲程度以及图像纹理的疏密程度,因此采用  $3 \times 3$  的分块策略。本文算法在 CPU 3.30 GHz,内存 8 GB 计算机上利用 Matlab 程序运行,不采用分块时配准一对图像大约需要 1.5 s。

### 3.1 仿真结果

对一幅图像[图 1(a)]先进行的仿射变换(包括平移、旋转、缩放和错切变换)得到图 1(b),然后利用本文方法进行配准效果的分析验证。

由于 LM 算法为局部最优算法,其解是否为全局最优依赖于初值的选取。为了给定最优初值,首先对待配准图像进行粗略匹配,即利用 Fourier-Mellin 配准算法<sup>[13]</sup>对可能存在的平移、旋转与缩放变换进行变换参数的求解,得到变换矩阵的粗略值,作为表 1 中 LM 算法的初值  $\mathbf{p}_0$ ,再运用 LM 搜索方法得到精确的仿射变换矩阵。

比较图 1(d)、(e)可知,基于 Fourier-Mellin 配准算法虽然部分校正了图像的平移、旋转和缩放,但配准效果仍然不理想,而本文算法最终得到了令人满意的配准结果。这说明 Fourier-Mellin 配准算法无法解决存在错切变换的配准问题,而本文方法对于周期性图像存在仿射变换的配准具有良好的匹配效果。

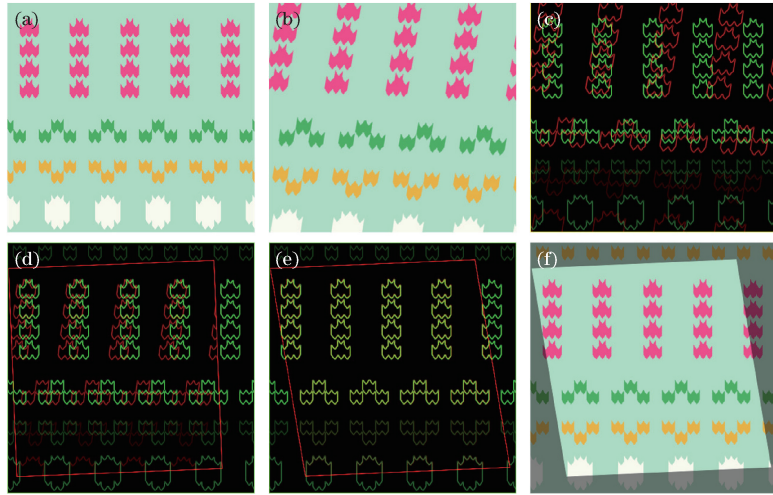


图 1 仿真图像配准结果。(a) 参考图像;(b) 待配准图像;(c) 原图边缘重叠;(d) Fourier-Mellin 配准算法粗配边缘重叠;  
(e) 本文方法精配边缘重叠;(f) 本文方法精配图像融合

Fig. 1 Registration results of simulated images. (a) Reference image; (b) image for registration;  
(c) overlap of original image edges; (d) overlap of image edges with rough registration based on Fourier-Mellin algorithm;  
(e) overlap of image edges with precise registration by the proposed algorithm;  
(f) image fusion with precise registration by the proposed algorithm

### 3.2 实际织物图像结果

对本文算法进行实际验证,并与基于 SIFT 特征点配准算法和基于 Fourier-Mellin 配准算法的结果进行对比。

在基于 SIFT 特征点的配准算法中,周期性元素的 SIFT 特征描述子一致,导致特征点对匹配时多数点对匹配错误,使图像无法配准。由图 2(b)可知,经过随机抽样一致(RANSAC)算法<sup>[16]</sup>去除错误匹配点对之后的 SIFT 特征配准算法结果并未配准。基于 Fourier-Mellin 配准算法解决了图像的平移、旋转和缩放变换,虽然结果有所改善,但由于错切变换的存在仍然无法完全配准。本文方法配准结果相对较好,这表明无论对于仿真测试图像还是对于实际织物图像,本文算法均能很好地配准具有周期元素的织物图像。

仔细观察图 2(g)可以发现,加框局部区域配准效果不理想,这说明本文算法在某些局部区域仍不能完全配准。考虑到织物图像的形变可能会有局部性差异,用一个统一的仿射变换矩阵来描述两幅图像之间的变换会导致局部区域配准效果不理想,为此引入分块配准思想以得到更好的配准效果。

分块配准将整幅图像划分为若干块,然后对每一局部块分别配准,再拼接为一整幅图。对比图 2(g)与图 2(h)可知,在基于本文方法配准的前提下,采用分块配准策略后可以得到更好的配准效果。再选取一组纹理较为复杂的图像进行分块配准效果验证,对比图 3(e)与图 3(f)可知,分块配准最终效果优于整幅图直接配准。

### 3.3 色差评估

将提出的配准方法应用于织物图像的色彩评估中,即将打样图像与标样图像配准后计算对应像素点的  $\Delta E_{CMC(2;1)}$  色差从而得到空间色差图<sup>[22]</sup>。考虑到图像边缘部分颜色有过渡,色差图中也会相应地出现边缘而影响真实评估,故在空间色差图中应抑制边缘部分<sup>[23]</sup>,依据为

$$O(x, y) = I(x, y) \exp[-\|\nabla I(x, y)\|^\kappa], \quad (28)$$

$$\|\nabla I(x, y)\| = \sqrt{I_x^2(x, y) + I_y^2(x, y)}, \quad (29)$$

式中  $(x, y)$  为空间像素点坐标,  $I(x, y)$  为色差图,  $I_x(x, y)$ 、 $I_y(x, y)$  分别为图像  $I(x, y)$  在  $x$  和  $y$  方向的梯度,  $O(x, y)$  为抑制边缘后的图像,  $\kappa = 0.8$ 。另外,由于织物为非刚体,不能保证每个像素点均对齐,直接对应像素点求色差会出现类似椒盐噪声的噪点,故对空间色差图作了窗口直径为 3 的中值滤波。图 4 所示色差分析结果表明第一对样本的白色、浅蓝色与深蓝色色差较大,黄色色差相对较小[图 4(a)、(b)];第二对样本的粉色色差相对明显[图 4(c)、(d)]。

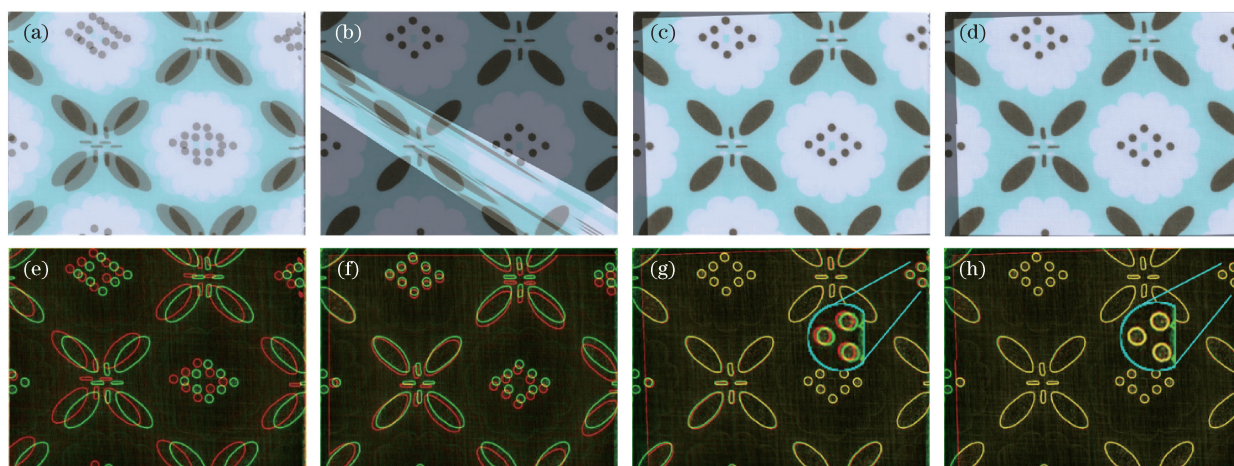


图 2 实际织物图像配准结果。(a) 原图融合;(b) 基于 SIFT 配准图像融合;(c) 本文方法配准图像融合;  
(d) 本文方法分块配准图像融合;(e) 原图边缘重叠;(f) 基于 Fourier-Mellin 配准边缘重叠;  
(g) 本文方法配准边缘重叠;(h) 本文方法分块配准边缘重叠

Fig. 2 Registration results of real fabric images. (a) Fusion of original image; (b) fusion of images with registration based on SIFT; (c) fusion of images based on the proposed algorithm; (d) fusion of images based on the proposed algorithm with block registration; (e) overlap of original image edges; (f) overlap of image edges with registration based on Fourier-Mellin algorithm; (g) overlap of image edges with registration based on the proposed algorithm; (h) overlap of image edges with registration based on the proposed algorithm with block registration

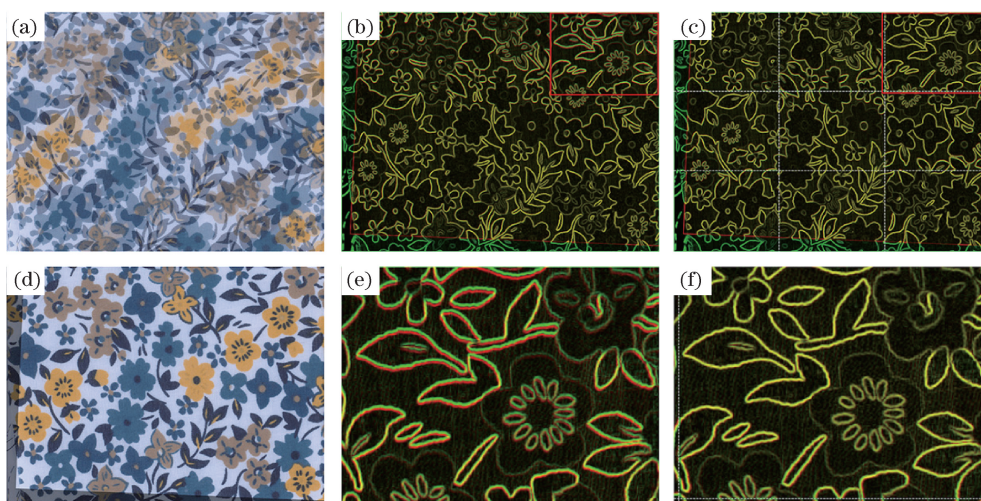


图 3 分块配准效果。(a) 原图融合;(b) 未分块配准边缘重叠;(c) 分块配准边缘重叠;(d) 分块配准图像融合;  
(e) 未分块配准边缘重叠局部放大;(f) 分块配准边缘重叠局部放大

Fig. 3 Results of block registration. (a) Fusion of original image; (b) overlap of image edges without block registration; (c) overlap of image edges with block registration; (d) image fusion with block registration; (e) local overlap of image edges without block registration; (f) local overlap of image edges with block registration

## 4 结 论

提出了一种基于仿射变换与 LM 算法的织物图像配准方法,该方法将两幅图像的配准问题转化为两幅图像对数极坐标频谱积分曲线的匹配问题,进而利用 LM 局部最优算法求解仿射变换参数,有效解决了具有周期元素的多光谱织物图像配准问题。另外,分块配准思想的引入进一步改善了配准效果。实验结果表明,该方法在仿真和实际图像的配准上均达到了理想的效果。此外,在标样图像与打样图像配准的基础上,引入空间色差概念,根据空间色差图可以直观评估标样图像与打样图像空间色差,亦验证了该算法的实际使用价值。



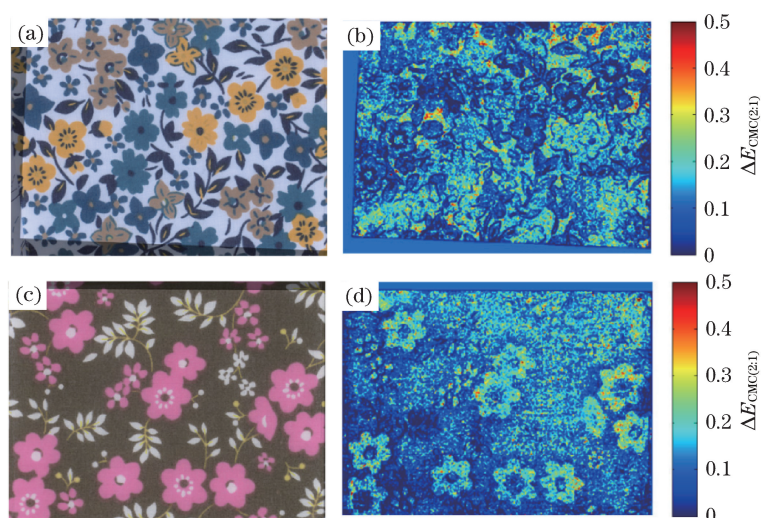


图 4 色差评估示例。(a)(c) 标样图像打样图像配准后融合;(b)(d) 标样图像打样图像空间色差  
 Fig. 4 Color difference evaluation. (a)(c) Fusion of standard and batch images after registration;  
 (b)(d) spatial color difference of standard and batch images

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Hardeberg J Y. Acquisition and reproduction of color images: colorimetric and multispectral approaches[M]. Parkland: Universal Publishers, 2001.
- [ 2 ] Zheng Zhihuan. Investigation of reflection component separation and spectrum measurement in color imaging[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.  
 郑芝寰. 颜色成像中的反射分量分离及光谱测量研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [ 3 ] Wyszecki G, Stiles W S. Color science[M]. New York: Wiley, 1982.
- [ 4 ] Schanda J. Colorimetry: understanding the CIE system[M]. New York: John Wiley and Sons, 2007.
- [ 5 ] Liu Haoxue, Huang Min, Wu Bing, *et al.* Study of color difference evaluation in color digital images[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0933001.  
 刘浩学, 黄 敏, 武 兵, 等. 彩色数字图像色差计算方法的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0933001.
- [ 6 ] Xin J H, Shen H L, Lam C C. Investigation of texture effect on visual colour difference evaluation[J]. Color Research and Application, 2005, 30(5): 341-347.
- [ 7 ] Russ J C. The image processing handbook[M]. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [ 8 ] Pappas T N. An adaptive clustering algorithm for image segmentation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992, 40(4): 901-914.
- [ 9 ] Krinidis S, Chatzis V. A robust fuzzy local information C-means clustering algorithm[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(5): 1328-1337.
- [10] Zitova B, Flusser J. Image registration methods: a survey[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(11): 977-1000.
- [11] Maintz J B A, Viergever M A. A survey of medical image registration[J]. Medical Image Analysis, 1998, 2(1): 1-36.
- [12] Reddy B S, Chatterji B N. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(8): 1266-1271.
- [13] Chen Q, Defrise M, Deconinck F. Symmetric phase-only matched filtering of Fourier-Mellin transforms for image registration and recognition[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(12): 1156-1168.
- [14] Xu Junze. Image registration technique based on log-polar domain[D]. Shanghai: Fudan University, 2009.  
 许俊泽. 对数极坐标域下的图像配准技术[D]. 上海: 复旦大学, 2009.
- [15] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [16] Luo J, Gwon O. A comparison of SIFT, PCA-SIFT and SURF[J]. International Journal of Image Processing, 2009, 3(4): 143-152.

- [17] Zhang Ruijuan, Zhang Jianqi, Yang Cui, *et al.*. Study of color image registration technique based on CSIFT[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(11): 2097-2103.  
张锐娟, 张建奇, 杨 翠, 等. 基于 CSIFT 的彩色图像配准技术研究[J]. *光学学报*, 2008, 28(11): 2097-2103.
- [18] Yang Sa, Yang Chunling. Image registration algorithm based on sparse random projection and scale-invariant feature transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1110001.  
杨 颢, 杨春玲. 基于压缩感知与尺度不变特征变换的图像配准算法[J]. *光学学报*, 2014, 34(11): 1110001.
- [19] Moré J J. The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory[M]. Berlin: Springer, 1978: 105-116.
- [20] Ourselin S, Roche A, Prima S, *et al.*. Block matching: a general framework to improve robustness of rigid registration of medical images[C]. *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, 2000: 557-566.
- [21] Vincent O R, Folorunso O. A descriptive algorithm for sobel image edge detection[C]. *Proceedings of Informing Science and IT Education Conference*, 2009: 97-107.
- [22] Clarke F J J, McDonald R, Rigg B. Modification to the JPC79 colour-difference formula[J]. *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, 1984, 100(4): 128-132.
- [23] Xu L, Jia J, Matsushita Y. Motion detail preserving optical flow estimation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(9): 1744-1757.